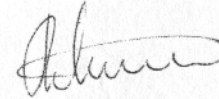


Автореферат
198

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЛЯХНО Валерій Юрійович



УДК 536.37; 621.578; 621.642; 53.082.74

**СКЛОПЛАСТИКОВІ КРІОСТАТИ ДЛЯ СКВІД МАГНІТОМЕТРІЇ
ВИСОКОГО РОЗРІЗНЕННЯ**

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи
кондиціонування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2012 р.

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної Академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Шпирков Володимир Іванович, провідний науковий співробітник
Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України,

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор кафедри кріогенної техніки
Одеської державної академії холоду
МОІ Молодьспорту України.
Троценко Олександр Володимирович

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технічної кріофізики
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»
МОІ Молодьспорту України
Жуль Георгій Григорович

Захист відбудеться «24» вересня 2012 року о 14.00 годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 при Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою:

1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

серпень 2012 р.

xv1263

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Бібліотека

1

ГАЛУЗЕВИЙ
ВІДДІЛ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Склопластикові кріостати є основними пристроями кріогенної техніки, які застосовуються для охолодження до гелієвих і/або азотних температур надпровідних квантових інтерференційних детекторів (СКВІДів). Якість кріостатів визначає важливі характеристики кріогенних приладів: тривалість (ресурс) роботи, масо-габаритні параметри, кількість циклів роботи без регенерації вакуумного простору, відстані до дослідного об'єкту і таке інше. СКВІДи є найчутливішими приймачами варіацій магнітного поля і всіх фізичних величин, які можуть бути в нього перетворені, широко використовуються в сучасній вимірювальній техніці і забезпечують прогрес у фізиці, метрології, геофізиці, дефектоскопії, медицині і біомагнетизмі. Сучасна тонкоплівкова технологія СКВІДів дозволяє створювати магнітометри з чутливістю до 10^{-15} Тл/Гц^{1/2}. Проте, загальна чутливість приладів, що розробляються на даний час обмежується власними шумами склопластикових кріостатів на рівні $(1-3) \cdot 10^{-14}$ Тл/Гц^{1/2}. Зниження власних шумів кріостатів, що пов'язані з властивостями склопластикових матеріалів, тепловими екранами та ізоляції є актуальними задачами розвитку кріогенної техніки. Крім того, висока проникливість газоподібного гелію крізь склопластикові оболонки у вакуумну порожнину кріостата призводить до різкого зростання теплових потоків. Тому зниження дифузії гелію крізь склопластику є ще однією важливою задачею при створенні кріостатів для сучасних багатоканальних біомагнітних комплексів. Нарешті, для кріостатів з великою кількістю шарів екранно-вакуумної теплоізоляції (ЕВТІ) не вирішена проблема створення високого вакууму в міжшаровому просторі, що є актуальним питанням для кріогенної техніки взагалі. Однак при створенні склопластикових кріостатів для СКВІД-магнітометрії рішення теплофізичних задач повинні бути узгоджені зі зменшенням електромагнітних перешкод від теплової ізоляції.

Таким чином, вирішення цих задач кріогенної техніки є необхідним для подальшого підвищення ефективності та чутливості сучасних вимірювальних приладів СКВІД-електроніки і визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційна робота виконана у відділі надпровідних і мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України відповідно до держбюджетної теми «Квантові когерентні явища в надпровідних мезоскопічних структурах» (номер державної реєстрації 0104U003032, шифр Ф16/12 1.4.10.16.11, термін виконання 2007-2011рр.), а також в рамках НТР «Створення квантового магнітометра для ранньої діагностики радіаційних пошкоджень конструкційних матеріалів», державний реєстраційний номер 0105U006638. У зазначених темах автор був співвиконавцем робіт.

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності систем криогенної техніки на базі склопластикових гелієвих кріостатів для СКВІД-магнітометрів високої чутливості, завдяки використанню нових матеріалів, модифікації теплової ізоляції та оптимізації конструкції кріостатів.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні **задачі**:

- виконати докладний аналіз механізмів генерування електромагнітних шумів в сучасних склопластикових кріостатів для СКВІД-магнітометрії високого розрізнення, та визначити найбільш перспективні напрямки зниження шумів кріостатів з урахуванням параметрів, що впливають на рівень теплових характеристик;
- дослідити дифузійні, магнітні і електромагнітні властивості композиційних матеріалів, багатощаровою ЕВТІ, теплових екранів та розробити нові модифікації цих елементів для склопластикових кріостатів;
- розробити математичну модель і провести дослідження напружено-деформованого стану профільованих частин склопластикових оболонок та оптимізувати конструкції кріостатів для багатоканальної магнітної енцефалографії (МЕГ);
- розробити технічні прилади і технологічні процеси для вирішення поставлених задач і створити експериментальні зразки спеціальних кріостатів для 100-канального МЕГ комплексу, магнітного СКВІД-мікроскопа, досліджень в надсильних імпульсних магнітних полях і СКВІД-магнітометру для діагностики конструкційних матеріалів з поліпшеними робочими характеристиками.

Об'єктом дослідження є процес термостабілізації при криогенних температурах надпровідних квантових інтерференційних детекторів для проведення високочутливих вимірювань варіацій магнітного потоку для проведення унікальних фізичних та біомедичних експериментів.

Предметом дослідження дисертаційної роботи є спеціальні склопластикові кріостати з низьким рівнем власних електромагнітних шумів, які призначені для охолодження високочутливих СКВІД-магнітометрів до температур рідких гелію та азоту.

Методи дослідження: порівняльний аналіз методами газової хроматографії і мас-спектрометрії коефіцієнтів проникливості газоподібного гелію крізь різні композитні матеріали; вивчення магнітної сприйнятливості склопластикових матеріалів і їх компонент за допомогою ВЧ СКВІД - магнітометра в інтервалі температур $T = 4,2-100$ К, вимірювання коефіцієнтів віддзеркалення модифікованої екранно-вакуумної теплоізоляції; комп'ютерне графічне моделювання, проектування і інженерний аналіз конструкцій склопластикових кріостатів; чисельне моделювання шумових магнітних потоків від елементів конструкції склопластикового кріостата; прямі статичні механічні випробування композитних матеріалів та низькотемпературних клейових з'єднань; вимірювання швидкості випаровування криогенної рідини методом потоку газу при сталому тиску.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше на підставі експериментальних досліджень показана можливість створення нових композитних склопластикових матеріалів зі значенням магнітної сприйнятливості при температурі $T = 4,2$ К понад 45 разів та її похідної від температури у 25 разів нижче ніж у стандартних склопластикових конструкційних матеріалів, що дозволяє суттєво зменшити магнітний шум кріостатів.

2. Вперше за допомогою СКВІД-магнітометра проведені дослідження залежностей від температури магнітної сприйнятливості композиційних матеріалів та їх компонент в діапазоні $T = 4,2-100$ К; визначено, що для більшості склопластикових матеріалів залежності магнітної сприйнятливості добре апроксимуються модифікованим законом Кюри-Вейса; досліджена поведінка магнітної сприйнятливості склопластиків від магнітного поля та показано наявність максимуму її в магнітному полі $> 0,1$ Тл зі значенням $\chi_{T=4,2K} \approx 4,5 \cdot 10^{-3}$.

3. Вперше проведено комплексне дослідження коефіцієнтів проникливості газоподібного гелію крізь різні склопластикові матеріали і визначено, що склопластики, які виготовлені з підготовлених і просочених у вакуумі матеріалів, мають мінімальні значення коефіцієнта проникливості $\sim 8 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$ при $T = 290$ К, що сприяє поліпшенню якості конструкційних матеріалів криогенних частин склопластикових кріостатів.

4. Створена концепція побудови гібридної структури композитного матеріалу, що поєднує відомі технології виготовлення скловолкнистих та фольгованих матеріалів, для пригнічення проникливості гелію скрізь горловини склопластикових кріостатів. Показано, що використання гібридної горловини з товщиною стінки 1,8 мм для склопластикових кріостатів з діаметром горловини 300 мм дозволяє в 2 рази зменшити теплоприплив за матеріалом горловини з одночасним зменшенням коефіцієнта проникливості гелію понад 30 разів.

5. Доопрацьовано відомий метод зниження електромагнітних перешкод від металевих поверхонь завдяки подрібненню їх на електрично роз'єднані ділянки та поширення його на технологію створення екрануючих шарів ЕВТІ. Експериментально досліджені залежності ступеня чорноти шарів ЕВТІ від розміру металізованих ділянок та винайдено оптимальний розмір (1-3 мм) для забезпечення електромагнітних флуктуацій від ЕВТІ на рівні 1 фТл/Гц^{1/2}.

6. Запропоновано нову комбіновану конструкцію теплових екранів з використанням фононної теплопровідності діелектричних матеріалів та доведено, що при використанні нових композитних матеріалів для виготовлення дна кріостата, модифікованої ЕВТІ і комбінованого теплового екрану власні шуми склопластикового кріостата для СКВІД-енцефалографа можуть бути знижені на порядок, тобто до рівня 1-2 фТл/Гц^{1/2}.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблено конструкцію, створено технічну документацію і

відпрацьовано технологію виготовлення склопластикових криостатів для 100-каналних СКВІД-магнітоенцефалографів, що створює криогенну базу для проведення унікальних досліджень активності кори головного мозку. Робота проводилася у співпраці з ТОВ «НВП Пластар», м.Харків, Україна, в рамках міжнародного проекту з фірмою ConverTech, м.Сеул, Республіка Корея.

Розроблені новий слабомагнітний композиційний матеріал, гібридна структура композиційного матеріалу горловини з низькою проникністю для газоподібного гелію, комбіновані теплові екрани і модифіковані пакети ЕВТІ були використані при створенні криостату для 100-каналного СКВІД енцефалографа, про що складений Акт впровадження з фірмою ТОВ «НВП Пластар» за №20-12 від 20 грудня 2011 року.

Крім того, розроблені слабомагнітні композиційні матеріали, специфічні теплові екрани і пакети ЕВТІ були використані при виконанні міжнародного контракту НДІЦ "Союз ВСТ" з Hochfeld Magnetlabor Dresden, м. Дрезден, Німеччина (Акт впровадження, вихід. №218 від 23 жовтня 2010 року).

Для досліджень СКВІД-магнітометром магнітної сприйнятливості реакторних матеріалів в полях до 7 Тл розроблено конструкцію і технічну документацію на виготовлення спеціального криостат-екрану. Ця розробка здійснювалася в рамках наукової співпраці з Науково-виробничим центром «РОСНА», м. Єкатеринбург, Росія і підтверджена Актом про впровадження науково-технічних розробок (за №65/2 від 3 березня 2008 року). Крім того, в ході виконання даної роботи отриманий Патент України (№ UA58271).

Для дефектоскопії багатопарових електронних плат інтерес становлять рішення, що знайдені при створенні криостата для СКВІД-мікроскопа з азотним рівнем охолодження.

Особистий внесок здобувача

В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень, що були отримані у співавторстві, де особистий внесок автора є визначальним. Постановка завдань досліджень, вибір об'єктів і методів дослідження виконувалися спільно з науковим керівником. Зразки для всіх експериментальних досліджень були підготовлені особисто. Дисертант самостійно проводив комп'ютерне моделювання, розробку конструкцій і підготовку технічної документації. Підготовка стенду для дослідження дифузії газоподібного гелію, наукові дослідження за допомогою газового хроматографа, двопробного спектр-аналізатора, СКВІД-магнітометра проводилися на специфічному науковому устаткуванні з провідною участю автора. Дисертантом особисто узагальнені отримані результати і виконані чисельні розрахунки. Статті і доповіді написані в співавторстві та докладалися автором на конференціях і семінарах.

Апробація результатів дисертації

- 1-й Українсько-Китайський форум «Наука-виробництво», м. Харків, Україна, травень 2007; (Опубліковано: *FRP Dewar for Multichannel Magnetic HTS SQUIDS Microscope / V.Yu. Lyakhno, V.I. Shnyrkov // Proc. Of*

First Ukraine-China Forum "Science-Manufacturing". "UCF-2007". –2007. Ukraine. Kharkov: KNURE. –P.86);

- 28 Міжнародна конференція «Композиційні матеріали в промисловості», СЛАВПОЛКОМ, м. Ялта, Україна, травень 2008; (Опубліковано: *Стеклопластиковый криостат для ВТСП СКВІД-мікроскопа/ В.Ю. Ляхно, А.Б. Шопен, В.И. Шнырков // Мат. 28-й Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности». –Ялта. –2008. –С.513-515; та Стеклопластиковый 4He криостат для работы в импульсных полях до 50 Тл/ В.Ю. Ляхно, А.В. Федорченко, О.Б. Кивиренко, В.И. Шнырков// Мат. 28-й Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности». –Ялта. –2008. –С.515-517.)*
- 2-га Науково-технічна школа-семінар «Біомедичні інформаційні технології в охороні здоров'я», БМІТ-2009, м. Київ, Інститут кібернетики НАНУ, Україна, червень 2009; (Опубліковано: *Криостат-екран для СКВІД структуроскопии реакторных материалов/ В.Ю. Ляхно, А.В. Федорченко, Г.Е. Ведерников, В.Б. Малков, Н.М. Крючков, В.И. Шнырков// Збір. допов. 2-ї наук.-техн. школи-сем. БМІТ-2009. –Київ: –Ін-т кібернетики НАНУ. –2009. –С.169-172.)*
- Щорічна науково-технічна школа-семінар «Біологічна і медична інформатика та кібернетика», ФМШ Жукін, м. Київ, Україна, червень 2010; (Опубліковано: *Гелиевый криостат для 100-канального магнитного энцефалографа / В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков // Матер. щорічної наук.-техн. школи-сем. «Біологічна і медична інформатика та кібернетика». – ФМШ Жукін. –2010. –С.95-96.)*

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 12 робіт: статей в фахових наукових журналах - 6, 1 Національний патент України, тез доповідей в збірниках наукових праць і матеріалах конференцій - 5.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та висновків. Висновки сформульовані після кожного розділу. Список цитованих джерел містить 150 найменувань. Загальний обсяг дисертації 140 сторінок, включаючи 44 малюнки і 6 таблиць. У Додатку А на п'яти сторінках наведено 4 акти про впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, обговорюються наукові та технічні проблеми, вирішенню яких присвячена робота. Сформульовані мета і основні задачі роботи, визначаються об'єкт, предмет і методи дослідження, формулюються результати, що виносяться на захист, їх наукова новизна і практичне значення, перелічуються публікації за матеріалами дисертації, наради і семінари, на яких доповідалися результати, описується структура дисертації.

У розділі 1 подається огляд літератури за темою дисертації та проводиться аналіз сучасного розвитку спеціального розділу криогенного

приладобудування, - склопластикових криостатів для охолодження СКВІДів, де розглядаються їх основні типові конструкції, фізичні та теплофізичні характеристики. Зазначено, що для подальшого розвитку низькотемпературної електроніки склопластикові криостати повинні мати рівень власних шумів на порядок нижче чим відзначено у літературі. Наприклад, того ж порядку або менше чутливості СКВІД-магнітометра ($\sim 10^{-15}$ Тл/Гц^{1/2}). Окрім того, підкреслено, що в багатьох застосуваннях необхідно значно покращити теплофізичні параметри криостата, тобто підвищити ресурс безперервної роботи приладу. На цей час Tristan Technologies, Inc. є найбільш відомим світовим виробником склопластикових криостатів для СКВІД-магнітометрії. Тільки ця корпорація набула досвіду та спроможна виготовляти криостати для багатоканальної магнітної енцефалографії (whole-head MEG), що дало змогу оснастити ряд лабораторій MEG комплексами під маркою Elekta Neugomag®. За заявленими технічними параметрами ці криостати забезпечують в області 1 Гц рівень власних шумів $(2-3) \cdot 10^{-15}$ Тл/Гц^{1/2} та швидкість випаровування гелію 15 літрів за добу.

При створенні медичних комплексів MEG, СКВІД- мікроскопів і СКВІД-дефектоскопів потрібно забезпечити мінімальну відстань від $T = 4,2$ К, до теплового об'єкту. При цьому жорсткі вимоги надаються до міцності конструкції цілком та, особливо, спеціальних донних частин склопластикових криостатів, що зазнають значних механічних навантажень. Наприклад, розміщення 100 каналів СКВІДів при дослідженнях нейронної активності мозку людини вимагає значної (~ 1 м²) площі холодної поверхні дна криостата, яка до того ж повинна відповідати формі голови. Діаметр горловини (400 мм) у такому криостаті призводить до зростання теплових потоків та збільшення дифузії газоподібного гелію по її боковій поверхні. Відмітимо, що питомий тепловий потік у склопластикових криостатах для СКВІД-магнітометрів залежно від розмірів і призначення коливаються від $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ Вт/см².

З аналізу літератури видно, що для сучасних криостатів на частотах нижче 1 Гц спостерігається шум типу $1/f$, пов'язаний з магнітними властивостями композиційних матеріалів. На частотах вище 3 Гц основний шум визначається шумом Найквіста та градієнтними шумами зумовлені конструкцією теплових екранів і пакетів екранно-вакуумної теплоізоляції. Тож стандартні конструкції теплових екранів і пакетів ЕВТІ не можуть бути використані у склопластикових криостатах для СКВІД-вимірювань.

Створення криостатів для охолодження СКВІД-апаратури з рівнем власних шумів $\sim 10^{-15}$ Тл/Гц^{1/2} та покращення їх теплофізичних параметрів і становлять основні завдання даної роботи. Для рішення цих важливих проблем необхідно було провести комплексні теоретичні та експериментальні дослідження в наступних напрямках: дослідити швидкості дифузії газоподібного гелію крізь різні типи склопластиків; вивчити магнітні властивості склопластиків та їх компонент при низьких температурах;

розробити модифіковану багат шарову теплову ізоляцію та ефективні комбіновані теплові екрани для пригнічення електромагнітних флуктуацій зі збереженням високих теплофізичних параметрів ізоляції. Крім того, ще одним важливим напрямком роботи становить розробка та створення на базі результатів цих досліджень спеціальних криостатів, що будуть сприяти розвитку фундаментальних фізичних експериментів, виміральної криогенної техніки та медичної діагностики.

В розділі 2 наведені методики та результати досліджень проникливості газоподібного гелію крізь різноманітні композитні матеріали. У цьому ж розділі описані дослідження магнітної сприйнятливості композитних матеріалів склопластикових криостатів при низьких температурах.

Відносні вимірювання методом мас-спектрометрії дозволили оцінити як коефіцієнт проникливості, так і коефіцієнт дифузії газоподібного гелію крізь композитні матеріали. Газопроникність вивчалася на серіях циліндрових зразків, що виготовлялись із застосуванням методу намотування на оправку та герметизації їх торцевих поверхонь. Відрізнялися серії зразків застосованими матеріалами та методами їх підготовки та просочення. Далі зовнішній об'єм заповнювався газоподібним гелієм та вмикалася система реєстрації іонного току мас-спектрометра. Вимірювання часу, до того як газ не з'явиться з іншого боку стінки зразка дозволяло оцінювати коефіцієнт дифузії газу у зразку, а подальший сталий газовий потік визначав коефіцієнт проникливості. У дослідженнях використовувався гелієвий течешукач з чутливістю до потоку $7 \cdot 10^{-12}$ м³ · Па · с⁻¹. Статистична похибка проведених вимірювань 12-15%.

На рис.1. показані характерні експериментальні залежності від часу

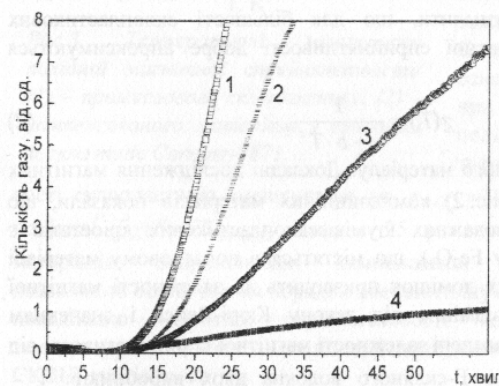


Рис.1. Експериментальні залежності від часу кількості газу, що пройшов крізь композитний матеріал горловини для 4-х зразків.

приведеного потоку газу, що пройшов крізь композитний матеріал горловини. Крива (1) приведена для типового зразка, що виготовлений намотуванням вологим препрегом; (2) - для зразка, що виготовлений з застосуванням вологого препрегу, підготовленого у вакуумі; (3) - для зразка, що виготовлений з укладанням одного шару склофольги завширшки 7 мм і завтовшки 40 мкм зі свинцевистого скла; (4) - для зразка склопластику, в

якому міститься один шар металевої стрічки завширшки 45 мм і завтовшки 100 мкм із неіржавіючої сталі.

Використання методу газової хроматографії дозволило провести калібрування і отримати абсолютне значення коефіцієнта проникливості композиційних матеріалів. Вимірювання проводилися ізостатичним шляхом, тобто за умови збереження рівного абсолютного тиску газів по обидві сторони досліджуваної поверхні, але при різниці відповідного парціального тиску газів. При цьому зразок не деформується, і у ньому не виникають напруги від перепаду абсолютного тиску. Ця методика забезпечила чутливість по концентрації 3 ppm і похибку калібрування 10%. Таким чином, вимірювання коефіцієнтів проникливості показали, що склопластики, які виготовлені з підготовлених і просочених у вакуумі матеріалів, мають мінімальні значення коефіцієнта проникливості для скловолокнистих матеріалів $\sim 8 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$.

Нами запропоновано гібридну структуру матеріалу горловини склопластикових кріостатів, що складається з основного скловолокнистого матеріалу і містить 2-3 шари тонкої фольги зі скла типу Corning-8871. Коефіцієнт проникливості для такого гібридного композиційного матеріалу зменшується до $1,5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$. Використання гібридної горловини з діаметром 300 мм товщиною стінки 1,8 мм для склопластикових кріостатів дозволяє в 2 рази зменшити теплоприплив за матеріалом горловини з одночасним зменшенням коефіцієнта проникливості гелію в 30 разів.

Дослідження магнітної сприйнятливості склопластикових матеріалів $\chi(T)$ проводилися за допомогою СКВІД-магнітометра в інтервалі температур $T = 4,2\text{--}200 \text{ К}$ і магнітних полів від 5 мТл до 3,5 Тл. Дані дослідження дозволили визначити, що для більшості склопластикових матеріалів залежності магнітної сприйнятливості добре апроксимуються функцією:

$$\chi(T) = \frac{1}{a + b \cdot T^c}, \quad (2)$$

де a, b, c - константи для даного матеріалу. Докладні дослідження магнітних властивостей компонент (рис. 2) композиційних матеріалів показали, що основним джерелом нерівноважних шумів склопластикових кріостатів є феромагнітні домішки (типу Fe_2O_3), що містяться в початковому матеріалі наповнювачів. Наявність цих домішок призводить до залежності магнітної сприйнятливості (1), яка відмінна від закону Кюрі-Вейса і значенням $\chi_{T=4,2} \approx 4,5 \cdot 10^{-4}$. На рис.2.а. наведені залежності магнітної сприйнятливості від температури для армуючого Е-скляного волокна двох виробників: 1 - «Полоцьк скловолокно»; 2 - «НВО Скловолокно». На вставці показані розраховані криві похідних $d\chi/dT$ від температури для цих матеріалів. Залежності магнітної сприйнятливості полімерних композицій від температури надані на рис.2.б: 3 - епоксидне зв'язувальне на основі смоли

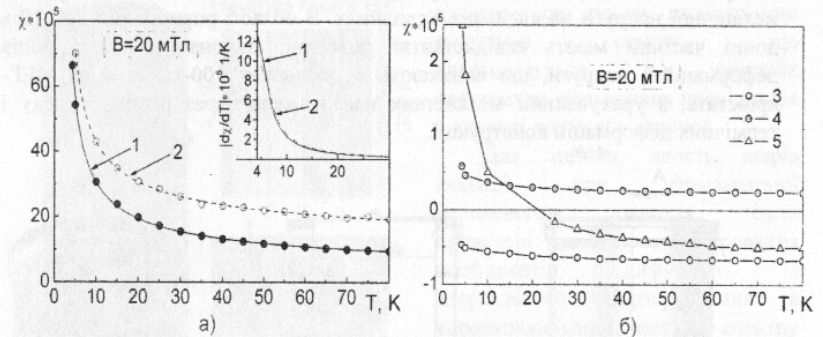


Рис.2. Залежності магнітної сприйнятливості зразків склопластикових матеріалів від температури.

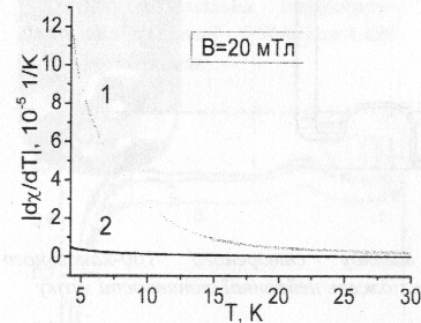


Рис.3. Температурні залежності похідної магнітної сприйнятливості: (1) - промислового склопластику, (2) - компенсованого матеріалу з волокном зі скла типу Corning-8871.

ЕД-20 з затверджувачем ізо-МТГФА, 4 - епоксидне зв'язувальне на основі смоли Епикот-828 (аналог ЕД-22) із затверджувачем ізо-МТГФА, а також 5 - свинцевистого скла типу Corning-8871. Дані дослідження показали (рис.3), що з використанням кварцових і високосилікатних ниток, ниток, які виготовлені з важких флінтів, скла типу Corning-8871 і зв'язуючого на основі епоксидної смоли ЕД-20 при вмісті 50/50 об'ємних частин полімеру і скляних волокон, значення магнітної сприйнятливості склопластиків зменшується до $\chi_{T=4,2} \approx 10^{-5}$ одиниць СІ. При цьому похідна $\{d\chi(T)/dT\}_{T=4,2\text{К}}$ стає в 25 разів нижче, ніж у промислових матеріалів. Запропоновані компенсовані склопластикові матеріали дозволяють більш ніж на порядок зменшити шум кріостатів, що пов'язаний із поведінкою магнітної сприйнятливості композиту при флуктуації температури або магнітного поля, і поліпшити симетрію антенних петель СКВІД-градієнтометрів.

У розділі 3 представлена конструкція та результати досліджень спроектованого і виготовленого склопластикового кріостата типу «шолом» для 100-канального СКВІД-магнітоенцефалографа з об'ємом рідкого гелію 73 літри (рис.4). Кожна донна частина склопластикових оболонок має

сполучення з відповідною циліндровою оболонкою для мінімізації стрибків механічної напруги на клейових з'єднаннях. В області розміщення СКВІДів донні частини мають евідистантні поверхні. Виконаний аналіз полів деформацій і напруги, що виникають в оболонках 100-канального МEG-криостата, з урахуванням механічних навантажень через різницю тиску і термічних деформацій конструкції.

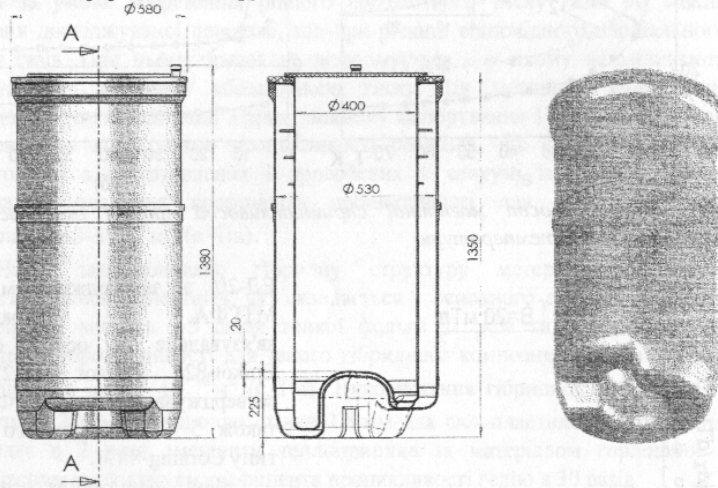


Рис.4. Креслення загального вигляду створеного 100-канального склопластикового криостата для досліджень нейронної активності мозку

Показано, що з урахуванням всіх можливих механізмів руйнування криостата, спроектована конструкція забезпечує запас міцності вище шести, а загальні деформації конструкції забезпечують робочі зазори в області «шолом»-дно не більше 22 мм. Проведені прямі криогенні випробування. Створені технології, що дозволяють виготовляти методом викладення з вакуумним пресуванням профільного дна криостата, як із звичайних, так і з нових компенсованих композиційних матеріалів.

Аналіз теплоприпливів до 100-канального склопластикового криостату дозволив провести оптимізацію конструкції його теплового захисту (рис.5). Слід відмітити, що, з одного боку, тепловий екран, який охолоджується за рахунок випаруваного гелію, зменшує потік тепла до рідкого гелію в десятки разів. З іншого боку, металевий тепловий екран є генератором шумів провідності. У даній роботі запропонована конструкція комбінованого теплового екрану, у якого нижня частина виготовлена з діелектричного матеріалу з високою фоновною теплопровідністю (сапфір, лейкосапфір, полікорунд), і зв'язана тепловим контактом з верхньою циліндровою частиною. Вочевидь, що в нижній частині екрану відсутній шум Найквіста і



Рис.5. Оптимальна структура теплової ізоляції 100-канального МEG-криостата.

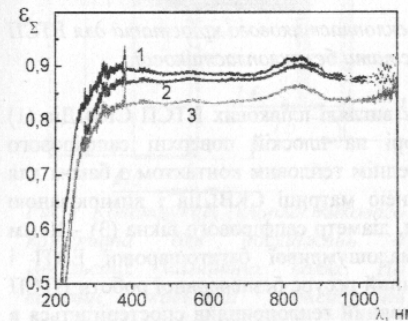


Рис.6. Залежність коефіцієнту повного віддзеркалення від довжини хвилі випромінювання 1 - первинна плівка теплоізоляції, 2 - фрагментована Al плівка з ділянками 8-10 мм, 3 - з ділянками

спектральна щільність шуму визначається тільки циліндровою частиною екрану, що виготовляється з окремих електрично ізолюваних провідників у вигляді дроту або стрічки.

Для оцінки якості шарів ізоляції при фрагментації металевого покриття були проведені вимірювання коефіцієнтів дифузного і дзеркального віддзеркалення в короткохвильовій частині спектру (рис.6). Вимірювання проводилися на скануючому двопробеному спектрометрі Lambda35 Perkin Elmer.

Представлені залежності відображають, що при середньому розмірі суцільних металевих ділянок 1-3мм, ефективність віддзеркалення в короткохвильовій частині зменшується на 10-15% відносно первинної плівки. Однак, із зростанням кількості шарів погіршення характеристик теплоізоляції в пакеті ЕВТІ з роздільниками типу скловуалі або базальтового паперу пов'язане з тією обставиною, що в конструкціях товстих пакетів теплоізоляції (70-100 шарів) не вдається забезпечити відкачування молекул газу і тиск між шарами значно перевищує 10^{-3} Па. Крім того, особливу увагу вимагає технологічна підготовка матеріалів шарів ЕВТІ, що укладаються. Тому за результатами досліджень було запропоновано використати в прилеглих до холодної поверхні основного бака пакетах ЕВТІ роздільники з нейлонової сітки.

Показано, що при використанні нових композиційних матеріалів при виготовленні дна криостата, модифікованої ЕВТІ і запропонованого комбінованого теплового екрану власні шуми склопластикового криостата для СКВІД-енцефалографа можуть бути доведені до рівня 1-2 фТл/Гц^{1/2}. За

наявності спеціальної пробки для збільшення конвекційного теплообміну в горловині, 85 шарів модифікованого пакету ЕВТІ та трьох теплових екранів рівноважна швидкість випаровування рідкого гелію становить 11 л/добу.

У розділі 4 представлені розроблені конструкції спеціальних криостатів, проведено аналіз їх конструктивних особливостей і техніко-економічних характеристик. Спроектований, виготовлений і випробуваний (рис.7) склопластиковий азотний криостат для багатоканального мікроскопа об'ємом 1,2 літра.

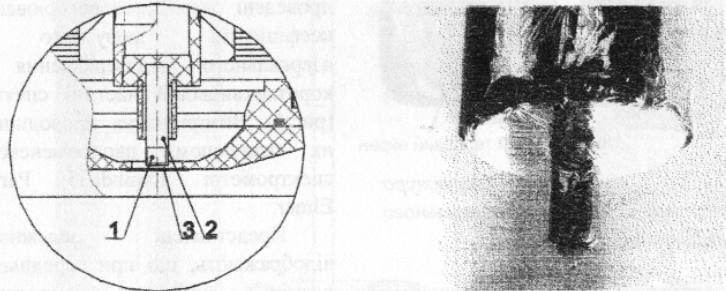


Рис.7. Конструкція нижньої частини склопластикового криостата для ВТСП СКВІД-мікроскопа і фотографія криостата без склопластикової.

Матриця з чутливих елементів у вигляді плівкових ВТСП СКВІДів (1) розташовується у вакуумному зазорі на плоскій поверхні сапфірового стрижня (2), який зв'язаний безпосереднім тепловим контактом з баком для рідкого азоту. Відстань між поверхнею матриці СКВІДів і вимірюваною радіоелектронною платою ~ 500 мкм, діаметр сапфірового вікна (3) - 10 мм завтовшки 300 мкм. Поєднання малозумливої багатшарової ЕВТІ і теплового екрану забезпечує 75-годинний ресурс безперервної роботи ВТСП СКВІД-мікроскопа. Показано, що основний теплоприплив спостерігається в зоні розташування сапфірового вікна. Спектральна щільність власних шумів криостата в місці розташування СКВІДів становить $S_N^{1/2} \approx 50 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ і на 80% визначається шумами від металевого сильфона, який необхідний для юстирування положення зовнішнього фланця.

Розроблена конструкція склопластикового гелієвого криостата об'ємом 4,3 літра для проведення досліджень в імпульсних магнітних полях до 50 Тл (рис.8). Криостат дозволяє розміщувати досліджуваний об'єкт розміром до 10 мм в максимумі магнітного поля біттеровського імпульсного соленоїда, що охолоджується рідким азотом. Великі швидкості зміни індукції магнітного поля ($dB/dt \approx 10^4 \text{ Тл/сек}$) у імпульсно-ному соленоїді можуть генерувати макроструми в металевих частинах криостата, а поля розсіяння імпульсного соленоїда різко збільшують сприйнятливості матеріалів криостата, що призводить до паразитного внеску в сигнал і зменшення

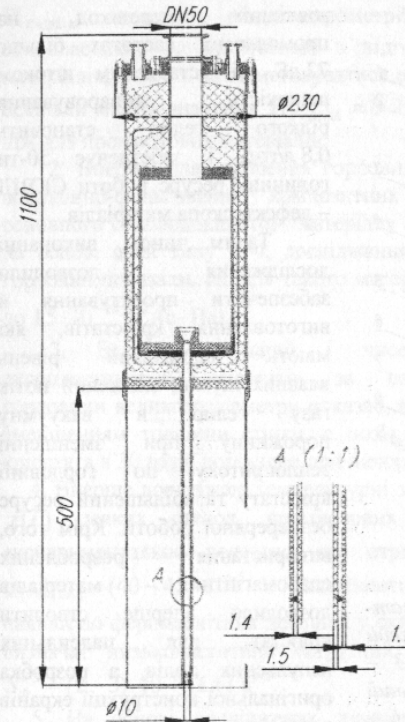


Рис.8. Конструкція склопластикового криостата для досліджень в імпульсних магнітних полях. На вставці наведена конструкція склопластикового пальця.

чутливості методу в цілому. Для уникнення цих явищ палець криостата виготовлено у вигляді коаксіальних склопластикових трубок з вакуумним зазором між стінками 1,4 мм (див. вставку на рис.8), що дозволяє віддалити основний бак криостата, тепловий екран і пакети ЕВТІ від соленоїда. Рівноважна швидкість випаровування рідкого гелію з криостата в стенді становить $\sim 2,5$ л/добу (~ 67 мВт) і на 60-65% визначається припливом тепла по пальцю криостата, що не містить ЕВТІ і теплових екранів. Використання слабомігнітних композиційних матеріалів на основі високо-модульної кварцової тканини дозволяє на два порядки зменшити значення магнітної сприйнятливості пальця криостата. Розроблено і створено гелієвий криостат-екран об'ємом 63 літри (рис.9) для вимірювань сприйнятливості зразків конструкційних сталей в діапазоні температур $T = 4,2-250$ К у магнітних полях до 7 Тл. Зовнішня циліндрова оболонка 1 криостата з дном і верхнім фланцем виконані з алюмінію марки АМц завтовшки 10 мм. Для утворення замкнутого контуру між циліндровою зовнішньою оболонкою і верхнім фланцем використовується металеве (індієве) ущільнення.

Коаксіально із зовнішньою алюмінієвою оболонкою розташовано алюмінієвий екран 6 завтовшки 2 мм. Екран 8 з відпаленої міді завтовшки 2 мм охолоджується тороїдальною азотною ємкістю 2 об'ємом 12,5 літрів. Титанова горловина криостата внутрішнім діаметром 123 мм кріпиться до титанового бака 3 за допомогою зварки в атмосфері аргону. Вибір такого матеріалу пов'язаний як із хорошими теплофізичними і конструкційними властивостями, так і з тією обставиною, що в цьому металі відсутні структурні переходи, які можуть приводити до намагніченості криостата з часом. Криостат, маючи 4 коаксіальних циліндрових екрана і 3 пакети теплоізоляції по 20 шарів, забезпечує сумарний коефіцієнт придушення

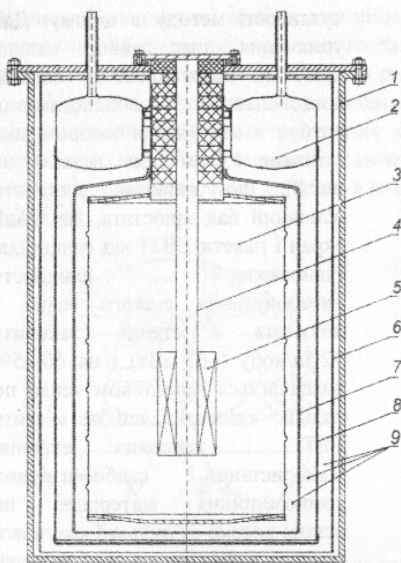


Рис. 9. Схема побудови криостат-екрана: 1 - зовнішній алюмінієвий корпус, 2 - азотний резервуар, 3 - гелієвий резервуар, 4 - вимірювальний шток, 5 - надпровідний соленоїд, 6 - алюмінієвий теплий екран, 7 - мідний охолоджуваний екран, 8 - мідний екран, 9 - шари екранно-вакуумної ізоляції.

зовнішніх перешкод на промислових частотах більше 72 дБ. Зі вставленим штоком швидкість випаровування рідкого гелію становить 0,8 л/год. і забезпечує 50-ти годинний ресурс роботи СКВІД - дефектоскопа матеріалів.

Таким чином, виконанні дослідження дозволили забезпечити проектування й виготовлення криостатів, які мають наднизький рівень власних шумів, знижений потік газу гелію в вакуумну порожнину при зменшенні теплопритоку по горловині криостату та збільшений ресурс безперервної роботи. Крім того, використання розроблених слабомагнітних матеріалів дозволило вперше створити криостат для надсильних імпульсних полів, а розробка оригінальної конструкції екранів дозволило спроектувати вітчизняний криостат-екран для СКВІД-діагностики структурних змін матеріалів з параметрами близько до світових аналогів.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове рішення наукової проблеми, що виявляється в підвищенні ефективності склопластикових гелієвих криостатів, які призначені для охолодження СКВІД-магнітометрів високої чутливості, завдяки зменшенню флуктуацій власних електромагнітних шумів та поліпшення теплофізичних характеристик. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дифузійних, магнітних і електромагнітних властивостей композиційних матеріалів, багатошаровою ЕВТІ, теплових екранів. Запропоновано нові структури та методи виготовлення композитних матеріалів та теплової ізоляції, що дозволили знизити власні шуми криостатів до рівня чутливості сучасних СКВІД-магнітометрів та вдосконалити їх теплофізичні властивості.

1. Прямі вимірювання коефіцієнтів проникливості газоподібного гелію

$P_{T=290K}$ методами мас-спектрометрії і хроматографії показали, що склопластики, які виготовлені з підготовлених і просочених у вакуумі матеріалів, можуть використовуватися для виготовлення оболонок криостатів оскільки мають значення $P_{T=290K} \approx 8 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$, що в 2,5 рази менше ніж для промислових матеріалів.

2. Вперше для створення горловини криостатів розроблена технологія волоконно-фольгованих композитних матеріалів, що складаються з основного скловолокнистого матеріалу і 2-3 шарів стрічкового склопластика на основі скла типу Ф-4, дослідження газової проникності серії зразків горловин показали, що для такого матеріалу значення $P_{T=290K}$ зменшуються до $1,5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$.

3. Експериментальний і чисельний аналізи тепловпливу до склопластикових криостатів за волоконно-фольгованим матеріалом горловини великого діаметру показав, що він може бути знижений в 2 рази зменшенням товщини стінки, а потік газу гелію у вакуумну порожнину криостата в 30 разів порівняно при використанні стандартних склопластиків.

4. Вперше досліджені температурні залежності магнітної сприйнятливості $\chi(T)$ деяких стекло, промислових склопластиків та їх складових, експериментально показано, що отримані для склопластиків значення $\chi_{(T=4,2K)} = (40 - 45) \cdot 10^{-5}$ і залежності $\chi(T) = (a + b \cdot T^c)^{-1}$ пов'язані з наявністю феромагнітних домішок у складі наповнювачів, концентрація яких визначає низькочастотний магнітний шум серійних криостатів на рівні $S_{\Phi}^{1/2} = (2 - 3) \cdot 10^{-14} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$.

5. На основі досліджених діамагнітних епоксидних смол та слабо парамагнітних наповнювачів запропоновані нові «компенсовані» композитні матеріали, із значеннями магнітної сприйнятливості $\chi_{(T=4,2K)} \approx 1 \cdot 10^{-5}$ та її похідної $(d\chi/dT)_{T=4,2K} \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, це дозволяє понизити магнітні шуми матеріалів криостатів до $S_{\Phi}^{1/2} \leq 10^{-15} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$.

6. На підставі проведених досліджень створено «шолом»-криостат для 100-канального СКВІД-енцефалографа з об'ємом рідкого гелію 73 л; показано, що з використанням «компенсованих» композитних матеріалів і запропонованих комбінованих теплових екранів спектральна щільність власних шумів криостатів становить $(2 - 3) \cdot 10^{-15} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$; розроблена в роботі модифікована ЕВТІ та тонка гібридна горловина дає можливість досягти швидкості випаровування рідкого гелію 11-14 л/дб.

7. Виконанні дослідження дозволили забезпечити проектування й виготовлення криостатів з новими техніко-економічними показниками:

- криостата для матричного СКВІД-мікроскопа з діаметром вікна 10 мм та з відстанню 500 мкм до теплового об'єкту, температурою СКВІДів $\sim 83 \text{ К}$, ресурсом безперервної роботи 75 годин та рівнем власних шумів

$\approx 50 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$;

- криостата для фізичних ЕПР експериментів в надсильних імпульсних полях понад 50 Тл з об'ємом рідкого гелію 4,3 л, ресурсом роботи 36 годин, та діапазоном робочих температур 1,8 - 4,2 К;

- криостата-екрана для СКВІД-діагностики структурних змін конструкційних матеріалів шляхом вимірювання магнітної сприйнятливості в магнітних полях до 7 Тл з об'ємом гелієвого баку 63 л, швидкістю випаровування гелію 0,8 л/год, та пригніченням зовнішніх електромагнітних шумів більш ніж 72 дБ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ляхно В.Ю. Стеклопластиковый криостат для магнитного микроскопа на основе ВТСП СКВИДов /В.Ю. Ляхно, С.И. Мельник, Ю.В. Фоменко, В.И. Шнырков // «Радиотехника». Всеукр. міжвідом. зб. наук. праць. Харків: Хар. нац. універ. Радіоелектроніки. –2007. –Вип.150. –С.159-166.

Особистий внесок автора: Розглянуто рівень магнітних шумів від елементів конструкції. Розроблена та змонтована модифікована теплова ізоляція. Проведені теплові розрахунки та криогенні випробування.

2. Ляхно В.Ю. Оптимизация параметров стеклопластикового криостата для биомагнитных исследований/ В.Ю. Ляхно, А.С. Гарбуз, Л.В. Гнездилова, А.В. Лопин, В.И. Шнырков // Приборы и техника эксперимента. –2009. – Вип.5. –С.150-155. (Lyakhno V.Yu. Parameters Optimization of the FRP Dewar Intended for Biomagnetic Investigations/ V.Yu. Lyakhno, A.S. Garbuz, L.V. Gnezdilova, A.V. Lopin, and V.I. Shnyrkov // Instruments and Experimental Techniques. –2009. –Vol.52, No.5. –P.752–757).

Особистий внесок автора: Проведено експериментальні дослідження дифузії газоподібного гелію крізь склопластики та запропоновано новий волоконно-фольгований матеріал горловин склопластикових криостатів. Розроблена конструкція діелектричного теплового екрану. Проведено оптимізацію фрагментування екранно-вакуумної ізоляції.

3. Lyakhno V.Yu. FRP Dewar for Measurements in High Pulsed Magnetic Fields / V.Yu. Lyakhno, A.V. Fedorchenko, O.B. Kivirenko, V.I. Shnyrkov // Cryogenics. –2009. –49. –P.425-428.

Особистий внесок автора: Виготовлено експериментальні зразки, узагальнені експериментальні данні для вимірювання магнітної сприйнятливості композиційних матеріалів. Розроблена конструкція, спроектовано, виготовлено та тестовано склопластиковий криостат для вимірювань у надсильних магнітних полях.

4. Федорченко А.В. СКВИД магнитометр для структуроскопии конструкционных материалов/ А.В. Федорченко, В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков// Питання атомної науки і техніки. Серія «Фізика радіаційних ушкоджень та радіаційне матеріалознавство». –2010. –Вип. 1(65). –С.150-156.

Особистий внесок автора: Розглянуто конструкцію криостата-екрану для проведення експрес діагностики конструкційних матеріалів. Визначено

XV1263
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

необхідний рівень зменшення перешкод для проведення СКВІД-магнітометрії. Проаналізовано існуючі схеми побудови та розроблена конструкція нового криостата-екрану.

5. Ляхно В.Ю. Особенности проектирования и изготовления стеклопластиковых оболочек гелиевого криостата для создания магнитного энцефалографа /В.Ю. Ляхно, О.Б. Кивиренко, Р.В. Варнас, А.А. Мудрый // «Питання проектування і виробництва конструкцій літальних апаратів». Зб. наук. праць. Харків: Нац. аерокосмічний університет «ХАІ». –2011. –Вип. 3(67). С.63-73.

Особистий внесок автора: Виконано проектування конструкції, розрахунки пружно - деформованого стану матеріалу конструкції та її механічної міцності. Розроблено технологічні етапи виготовлення криостату та потрібна технологічна оснастка.

6. Guskov V.P. The Investigation of Low Temperature Vacuum Drying Processes of Agricultural Materials/ V.P.Guskov, L.A.Bazyma, A.V.Basteev, V.Yu.Lyakhno, A.M. Lyashenko, V.A.Kutovoy// Journal of Food Engineering, 2005, Vol 74/3, pp.410-415.

Особистий внесок автора: Брав участь у підготовці вакуумного стенду та експериментальному дослідженні процесу зменшення вологовмісткості пористих та волокнистих матеріалів за допомогою вакуумування. Вивчався процес квазі-ізотермічної сушки.

7. Національний патент України - №58271, МПК F17C 3/00 F17C 13/00 G01R 33/16 G01R 33/035 G01N 27/72. Криостат-екран для вимірювань магнітної сприйнятливості матеріалів у сильних магнітних полях // В.Ю. Ляхно, В.І. Шнырков, М.М. Будник, Заявл. 01.09.2010; Опубл. 11.04.2011, Бюл. №7. -6с.

Особистий внесок автора: Розглянуто рівень зменшення магнітних перешкод на промислових частотах в залежності від побудови та температури екрануючих оболонок, їх геометричних параметрів.

8. Lyakhno V.Yu. FRP Dewar for Multichannel Magnetic HTS SQUIDS Microscope / V.Yu. Lyakhno, V.I. Shnyrkov // Proc. Of First Ukraine-China Forum "Science-Manufacturing". "UCF-2007". –2007. Ukraine. Kharkov: KNURE. –P.86

9. Ляхно В.Ю. Стеклопластиковый криостат для ВТСП СКВИД – микроскопа / В.Ю. Ляхно, А.Б. Шопен, В.И. Шнырков // Мат. 28-й Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности». –Ялта. –2008. –С.513-515.

10.Ляхно В.Ю. Стеклопластиковый 4He криостат для работы в импульсных полях до 50 Тл / В.Ю. Ляхно, А.В. Федорченко, О.Б. Кивиренко, В.И. Шнырков // Мат. 28-й Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности». –Ялта. –2008. –С.515-517.

11. Ляхно В.Ю. Криостат-екран для СКВИД структуроскопии реакторных материалов/ В.Ю. Ляхно, А.В. Федорченко, Г.Е. Ведерников, В.Б. Малков,

Н.М. Крючков, В.И. Шнырков // Збір. допов. 2-ї наук.-техн. школи-сем. БМІТ-2009. –Київ: –Ін-т кібернетики НАНУ. –2009. –С.169-172.

12. Ляхно В.Ю. Гелиевый криостат для 100-канального магнитного энцефалографа / В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков // Матер. щорічної наук.-техн. школи-сем. «Біологічна і медична інформатика та кібернетика». –ФМШ Жукін. –2010. –С.95-96.

АНОТАЦІЯ

Ляхно В.Ю. Склопластикові криостати для СКВІД-магнітометрії високого розрізнення. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська державна академія холоду, МОНМС України, Одеса, 2012.

У дисертації проведені детальні дослідження склопластикових криостатів, призначених для термостабілізації надпровідних квантових інтерференційних детекторів, для створення нових вимірювальних приладів. Основні фізичні питання, що розглянуті в роботі: дослідження і пригнічення дифузії газоподібного гелію крізь склопластикові горловини, вивчення магнітних властивостей композиційних матеріалів за криогенних температур та сильних магнітних полів, оптимізація характеристик екранно-вакуумної теплоізоляції і теплових екранів з погляду одночасної мінімізації електромагнітних перешкод для проведення вимірювань і теплових потоків до криогенної смкоти. Запропоновані в роботі нові композиційні матеріали, конструкції горловини, комбінованих діелектричних екранів і модифікованих пакетів екранно-вакуумної ізоляції пройшли апробацію і дозволили розробити ряд криостатів з поліпшеними характеристиками для проведення фізичних і біомедичних досліджень.

Ключові слова: надпровідний квантовий інтерференційний детектор, термалізація СКВІД-магнітометрів, склопластиковий гелієвий криостат, склопластиковий криостат для магнітного энцефалографа, спектральна щільність власних магнітних шумів, теплопровідність композиційних матеріалів, екранно-вакуумна теплоізоляція.

АННОТАЦИЯ

Ляхно В.Ю. Стеклопластиковые криостаты для СКВИД-магнитометрии высокого разрешения.- Рукопись. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14.– Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода, МОНМС Украины, Одесса, 2012.

Работа посвящена разработке новых систем криогенной техники на базе стеклопластиковых гелиевых криостатов для термостабилизации высокочувствительных СКВИД магнитометров. Использование специальных стеклопластиковых криостатов с жидким гелием или азотом связано с тем,

что шум Найквиста в обычных металлических криостатах на два-три порядка превышает чувствительность СКВИДов, а возникающие в металлических оболочках токи искажают распределение магнитных полей от измеряемых источников. К таким стеклопластиковым криостатам предъявляются специфические требования: минимум собственных шумов при большом ресурсе работы; низкие скорости диффузии газообразного гелия через горловину при минимальной толщине ее стенки; высокая механическая прочность конструкции, при минимальном расстоянии от приемной антенны СКВИДа до теплового объекта.

Описаны методика и результаты экспериментальных исследований магнитной восприимчивости различных композиционных материалов и их компонент, а также диффузии газообразного гелия через композиционные материалы стеклопластиковых криостатов. Показано, что для новых предложенных компенсированных композиционных материалов значение магнитной восприимчивости при температуре жидкого гелия может быть уменьшено до $1 \cdot 10^{-5}$ единиц СИ. Предложен новый «гибридный» материал для изготовления горловин стеклопластиковых криостатов, который позволяет снизить диффузию газообразного гелия в 30-50 раз по сравнению с материалами, традиционно используемыми при изготовлении стеклопластиковых криостатов.

Изложены материалы конструкторских и технологических разработок для изготовления ряда специфических стеклопластиковых криостатов. Описана конструкция спроектированного и изготовленного низкошумящего стеклопластикового криостата типа «шлем» для 100-канального СКВИД-магнитоэнцефалографа с объемом бака для жидкого гелия 73 литра. Выполнен комплекс инженерных расчетов, проектирование и отработаны технологические приемы изготовления стеклопластикового криостата с профильной донной частью. Показано, что с учетом всех возможных механизмов разрушения криостата, спроектированная конструкция обеспечивает запас прочности выше шести, а общие деформации конструкции обеспечивают рабочие зазоры в области дна не более 22 мм. Проведены прямые криогенные испытания криостата. Использование новых композиционных материалов при изготовлении дна криостата, фрагментированной экранно-вакуумной изоляции и предложенного комбинированного теплового экрана позволяют обеспечить собственные шумы стеклопластикового МЭГ-криостата на уровне $1-2 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$. Предложено использовать новые разделительные материалы в слоях экранно-вакуумной изоляции для обеспечения качественной откачки холодных слоев. При этом анализ теплопритоков к криостату со специальной пробкой (для увеличения конвекционного теплообмена в горловине), с 85 слоями комбинированного пакета изоляции и тремя тепловыми экранами, показал, что равновесная скорость испарения жидкого гелия составляет 11-14 л/сут, в зависимости от деталей конструкции теплового экрана.

С использованием нового композитного материала с пониженным

значением магнитной восприимчивости при температурах жидкого гелия и в сильных магнитных полях, а также со специфическими тепловыми экранами и модифицированными пакетами ЭВТИ разработан, изготовлен и испытан стеклопластиковый криостат объемом 4,3 литра для проведения исследований в импульсных магнитных полях напряженностью более 50 Тл.

Для исследований магнитной восприимчивости конструкционных материалов в полях до 5 Тл разработана конструкция и техническая документация на изготовление специального криостата-экрана.

В работе детально обсуждаются особенности изготовления и результаты исследования стеклопластикового криостата для магнитного микроскопа на основе матрицы СКВИДов азотного уровня охлаждения для дефектоскопии конструкционных материалов. При диаметре сапфирового окна криостата 10 мм расстояние между измеряемым образцом и чувствительными элементами не превышает 500 мкм.

Ключевые слова: сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор, термализация СКВИД-магнитометров, стеклопластиковый гелиевый криостат, стеклопластиковый криостат для магнитного энцефалографа, спектральная плотность собственных магнитных шумов, теплопроводность композиционных материалов, экранно-вакуумная теплоизоляция.

ABSTRACT

Lyakhno V.Yu. FRP Dewars for High-Resolution SQUID Magnetometers. - Manuscript.

Thesis for the candidate degree in technical sciences by specialty 05.05.14.– Refrigerating equipment, vacuum and compressor equipment, conditioning systems. – Odessa Academy State of Refrigeration, Odessa, 2012.

Detailed studies of FRP cryostats intended for thermal stabilization of superconducting quantum interference detectors and creation of new measuring devices are carried out in the dissertation. The following principal physical problems are discussed in this work: suppression of diffusion of gaseous helium through FRP cryostat necks, study of magnetic properties of composite materials at cryogenic temperatures and high magnetic fields, optimization of characteristics of thermal superinsulation and thermal shields from the point of view of simultaneous minimization of heat flow incoming to the cryogenic vessel and electromagnetic interferences preventing due measurements. Suggested in this work new composite materials, neck design, combined dielectric shields and modified packets of thermal superinsulation were tested and enabled designing of a number of cryostats with enhanced characteristics to make physical and biomedical investigations.

Key words: superconducting quantum interference detector, thermalization of SQUID magnetometers, FRP helium cryostat, FRP cryostat for magnetic encephalograph, spectral density of intrinsic magnetic noise, thermal conductance of composite materials, thermal superinsulation.